



بررسی تجربی چرمه‌گی شکست تنش صفحه‌ای ورق سه‌لایه آلومینیوم/مس/آلومینیوم ساخته شده به روش پیوند سرد نوردی

داود رحمت آبادی^۱، بیژن محمدی^۲، رامین هاشمی^{۳*}، تقی شجاعی^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۳- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

۴- دانشجوی دکترا، مهندسی مکانیک، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

* تهران، صندوق پستی 1684613114 rhashemi@iust.ac.ir

کلید واژگان:

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 11 اسفند 1395

پذیرش: 18 فروردین 1396

ارائه در سایت: 11 اردیبهشت 1396

چرمه‌گی شکست

نورد سرد پیوندی

کامپوزیت لایه‌ای

خواص مکانیکی و میکروسکوپ الکترونی

روش

چکیده
در سال‌های اخیر کامپوزیت‌های لایه‌ای مورد توجه بسیاری از محققین و صنایع مختلف قرار گرفته است. یکی از روش‌های تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای روش پیوند سرد نوردی می‌باشد که نسبت به سایر روش‌های تولید کامپوزیت از لحاظ اقتصادی به صرفه می‌باشد و قابلیت تولید کامپوزیت‌های لایه‌ای با جنس‌های مختلف را دارد. در این تحقیق برای اولین بار چرمه‌گی شکست تنش صفحه‌ای به صورت تجربی برای نمونه‌ی کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی با استفاده از نمونه‌های کششی فشرده و مطابق با استاندارد ASTME561 مشخص شده است. چرمه‌گی شکست یکی از پارامترهای مهم ماده در طراحی می‌باشد که بررسی آن به منظور پیش‌بینی عمر و رشد ترک مواد ترکدار در برای اعمال تنش می‌باشد. علاوه بر بررسی چرمه‌گی شکست، خواص مکانیکی با استفاده از آزمون کشش تک محوره، میکروسختی و سطح مقطع شکست با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روشنی و میکروسکوپ نوری مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصل از آزمون‌های انجام شده حاکی از افزایش استحکام، میکروسختی و چرمه‌گی شکست برای نمونه‌ی کامپوزیتی آلومینیوم/مس/آلومینیوم نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیوم 5052 و مس مالاصل می‌باشد که عامل اصلی این افزایش اعمال کرنش زیاد و کار سرد می‌باشد. چرمه‌گی شکست برای نمونه‌ی تولید شده به $38.7 \text{ MPa.m}^{1/2}$ رسید که نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیوم و مس به ترتیب ۸۱٪ و ۱۶۵٪ افزایش می‌باشد. عکس‌های میکروسکوپ الکترون روشنی نشان می‌دهد که مکانیزم شکست نرم برای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/مس/آلومینیوم همانند نمونه‌های اولیه مشاهده می‌شود البته با این تفاوت که بیکروفراحت برای نمونه‌ی کامپوزیتی نسبت به نمونه‌های اولیه کم عمق تر و کوچکتر شده‌اند.

Experimental investigation of plane stress fracture toughness for Al/Cu/Al multilayer produced by Cold Roll Bonding method

Davood Rahmatabadi, Bijan Mohammadi, Ramin Hashemi*, Taghi Shojaee

School of Mechanical Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

* P.O.B. 1684613114, Tehran, Iran, rhashemi@iust.ac.ir

ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 01 March 2017

Accepted 07 April 2017

Available Online 01 May 2017

Keywords:

Fracture toughness

CARB

Layer composite

Mechanical properties, SEM

ABSTRACT

In recent years, metallic multilayer materials have been the focus of many researchers and different industries. Cold roll bonding is one of the methods for producing layered composites which, compared to other composite manufacturing methods is more economic and has the ability to produce layered composite with different material. In this research, for the first time and according to ASTM-E561 and using compact tension specimens, plane stress fracture toughness for thin three-layer Al/Cu/Al composite sheets produced by Cold Roll Bonding Process was investigated. The fracture toughness is an important parameter in the design and their analysis can predict crack growth and life for material that has crack. In addition to the fracture toughness, mechanical properties and tensile fracture surfaces were evaluated by using uni-axial tensile test, micro hardness and scanning electron and optic microscopy, respectively. Results showed the value of tensile strength, microhardness and fracture toughness for Al/Cu/Al layered composite compared to initial Al 5052 and pure Cu increased, the main cause of this increase is applied high strain and cold working. Value of fracture toughness for Al/Cu/Al layered composite received $38.7 \text{ MPa.m}^{1/2}$ that compared to initial Al5052 and pure Cu, 81% and 165% enhanced, respectively. Results of SEM demonstrated that ductile fracture mechanism were observed for Al/Cu/Al composite such as initial samples, but the difference is that dimples for composite layers are shallower and smaller compared to initial samples.

Please cite this article using:

D. Rahmatabadi, B. Mohammadi, R. Hashemi, T. Shojaee, Experimental investigation of plane stress fracture toughness for Al/Cu/Al multilayer produced by Cold Roll Bonding method, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 5, pp. 166-174, 2017 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

۱- مقدمه

پارامترهای حاکم بر ایجاد پیوند مناسب در پیوند نوردی، به منظور درک ماهیت پیچیده مکانیزم اتصال در این فرآیند انجام شده است، و شرایط روند اتصال به خوبی تعریف شده است. گزارش شده است که پیوند سرد نوردی [14]، فلزات متاثر از پارامترهای مختلفی مثل کاهش ضخامت در طول نورد [14]، درجه حرارت اتصال [15]، زمان آتیل قبل و بعد از فرآیند [16]، سرعت نورد [18] ضخامت اولیه [18,14]، جهت نورد [14] و حضور ذرات بین ورق [19] می‌باشد، همچنین نورد سرد پیوندی به منظور تولید مواد مختلفی مورد استفاده قرار گرفته است، از قبیل آلومینیوم [12]، فولاد [20]، مس [21]، کامپوزیت آلومینیوم-مس [22]، کامپوزیت آلومینیوم-تیتانیوم [23]، کامپوزیت آلومینیوم-منیزیم [24].

یکی از پارامترهای مهم مواد در زمینه شکست و طراحی سازه، چرمگی شکست می‌باشد که عبارت است از میزان انرژی مورد نیاز برای توسعه ترک در یک ماده. بررسی و محاسبه چرمگی شکست به منظور پیش بینی عمر و رشد ترک در قطعات دارای ترک می‌باشد. استحکام شکست در حالت تنش صفحه‌ای علاوه بر اینکه تابع ضخامت است تابع درجه حرارت و نرخ بارگذاری نیز می‌باشد همچنین مقادیر آن می‌تواند با تغییر طول اولیه ترک نیز تغییر نماید. منحنی آر^۶ روشی برای تعیین مقاومت شکست مواد در طی رشد آرام و پایدار ترک است. این روش چگونگی افزایش استحکام به شکست را با افزایش بار وارد به نمونه ترک دار طی رشد آرام ترک در حالت تنش صفحه‌ای ترسیم می‌کند. در واقع منحنی آر بیانگر تغییرات مقاومت به رشد ترک بر حسب طول ترک است.

در سال‌های اخیر، روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک مورد توجه سیاری از محققین قرار گرفته است و هر کدام از این روش‌ها، برای کاربردی شدن، نیازمند بررسی خواص مکانیکی و متالوژیکی بیشتری می‌باشد. به همین منظور، بررسی خواص شکست مانند چرمگی شکست و مقاومت رشد ترک می‌تواند یکی از پارامترهای موثر باشد. در چند سال اخیر، بررسی چرمگی شکست برای اکثر روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک بیان گر اهمیت بررسی این پارامتر برای روش‌های مذکور می‌باشد. البته این بررسی‌ها به صورت محدود و تنها برای حالت‌های خاصی صورت گرفته است. محمدی و همکاران به بررسی چرمگی شکست نمونه‌های مسی ریزدانه شده به وسیله فرآیند تاکردن و صاف کردن متواالی^۷ پرداختند [25]. وارت و پیپن^۸ به بررسی و محاسبه چرمگی شکست نمونه‌ی ریزدانه نیکلی تولید شده به روش تغییرشکل پیچشی تحت فشار زیاد^۹ پرداختند [26]. سابیرو^{۱۰} و همکاران به بررسی چرمگی شکست تیتانیوم تولید شده به روش تغییر شکل در کانال‌های مشابه زاویه‌دار^{۱۱} پرداختند [27]. دریان و همکاران به بررسی چرمگی شکست در نمونه‌ی آلومینیوم 7075 تولید شده به روش تغییر شکل در کانال‌های مشابه زاویه‌دار پرداختند [28]. رحمت‌آبادی و همکاران به بررسی چرمگی شکست ورق آلومینیومی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی پرداختند [29]. با بررسی تحقیقات پیشین، نتایج قابل تأملی حاصل شد، به طوری که مقدار چرمگی شکست برای نمونه‌های تولید شده به روش نورد سرد پیوندی و فرآیند تاکردن و صاف کردن متواالی نسبت به نمونه‌های اولیه افزایش یافت، اما مقدار چرمگی شکست برای نمونه‌های تولید شده به روش تغییر شکل پیچشی تحت فشار زیاد نسبت به نمونه‌های اولیه کاهش

در سال‌های اخیر، کامپوزیت‌های زمینه فلزی و لایه‌ای به واسطه خواصی مانند استحکام بالا و وزن پایین نسبت به دیگر مواد فلزی مورد توجه بسیاری از محققین قرار گرفته‌اند [1]. این مواد دارای کاربردهای گوناگونی در صنایع مختلف می‌باشند [2]. آلومینیوم با قیمت کم و چگالی پایین در مقایسه با سایر آلیاژهای سبک مانند منیزیم و تیتانیم بیشترین کاربرد و مصرف را در بین کامپوزیت‌های زمینه فلزی دارد و به واسطه خواص آلومینیوم، می‌توان تلفیق مناسبی از استحکام، انعطاف‌پذیری و مقاومت به خوردگی را در کامپوزیت‌های زمینه فلزی بدست آورد [3]. همچنین آلیاژهای لایه‌ای و کامپوزیت‌آلومینیوم بیشتر در صنایع انومیل‌سازی برای کاربردهای انتقال حرارت به دلیل داشتن چندین ویژگی جالب و به صورت همزمان مانند چگالی کم، خواص مکانیکی مطلوب، هدایت حرارتی خوب و مقاومت به خوردگی نسبتاً خوب مورد استفاده قرار می‌گیرد [4]. هدایت الکتریکی بالا و مقاومت الکتریکی پایین مس سبب شده تا یکی دیگر از فلزات پرکاربرد در کامپوزیت‌های زمینه فلزی و چندلایه بهشمار آید. کامپوزیت آلومینیوم-مس به سبب خواص مطلوب دو فلز مس و آلومینیوم می‌تواند کاربردهای فراوانی در صنایع از جمله هواپیما، خودرو، برق و الکتریک و متالورژی داشته باشد [5]. همچنین از کامپوزیت‌های آلومینیوم/مس به جای قطعات خاص مسی در سیستم‌های انتقال قدرت در زمانی که وزن و هزینه نظر باشد بکار گرفته می‌شود، بنابراین، جوش دو فلز غیر مشابه مس و آلومینیوم می‌تواند موجب طراحی بهینه‌ای برای سیستم‌های انتقال قدرت شود [6].

از بین تکنولوژی‌های موجود، روش پیوند سرد نوردی^۱، یک روش جدید برای تولید مواد و کامپوزیت‌های چندلایه می‌باشد. این روش که در دسته روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک^۲ قرار می‌گیرد در سال‌های اخیر بهدلیل ویژگی‌های کاربردی منحصر به فرد در مقایسه با سایر روش‌های تغییر شکل شدید پلاستیک رشد و توسعه سرعی داشته است [4]. از جمله این ویژگی‌ها می‌توان به ساده بودن، عدم محدودیت در ابعاد نمونه و پیوسته بودن فرآیند، عدم نیاز به قالب و تجهیزات با توان بالا، و همچنین قابلیت خودکار کردن آن، اشاره کرد. فرآیند پیوند سرد نوردی توسط محققین با اصطلاح‌های مختلفی مثل جوش فشاری سرد به وسیله نورد^۳ [7] پیوند به وسیله نورد سرد^۴ [8] پوشش به وسیله نورد^۵ [9] پیوند سرد نوردی [10] معروف شده است. پیوند سرد نوردی، نوعی جوشکاری حالت جامد می‌باشد، که پیوند آن بر اثر تغییرشکل پلاستیک در سطح مشترک فلزات پیوند ایجاد می‌شود. در این روش پیوند زمانی ایجاد می‌شود که انساط سطحی در سطوح ورق‌ها ایجاد شود. به عبارت دیگر فشار باید به اندازه کافی زیاد باشد به طوری که باعث خارج شدن فلز اصلی از شکاف‌های ایجاد شده روی سطح شود که این موضوع باعث ایجاد تماس بین دو لایه و ایجاد پیوند می‌شود [12]. این فرآیند را می‌توان بر طیف گسترده‌ای از فلزات اعمال کرد، که این مواد می‌توانند از یک جنس و یا جنس‌های مختلف باشند، علاوه بر این، فلزاتی را که به وسیله جوش سنتی نمی‌توان به هم جوش زد، می‌توان با این روش بهم اتصال داد [12]. در اوایل سال‌های ابداع این روش، آنرا به عنوان یک روش امیدبخش برای تولید انبوه ورق و فویل قلمداد می‌کردند [13]. در سال‌های اخیر از فرآیند پیوند سرد پیوندی به طور گسترده برای تولید ورق‌ها و فویل‌های لایه‌ای بزرگ استفاده شده است [12]. مطالعات بسیاری بر روی

⁶ R curve⁷ Constrained Groove Pressing (CGP)⁸ Hohenwarter and Pippin⁹ High Pressure Torsion (HPT)¹⁰ Sabirov¹¹ Equal Channel Angular Pressing (ECAP)¹ Cold Roll Bonding (CRB)² Severe Plastic Deformation (SPD)³ Cold Pressure Welding by Rolling⁴ Bonding by Cold Rolling⁵ Clad Sheet by Rolling

نوری و بررسی سطح مقطع شکست به وسیله میکروسکوپ الکترونی روشنی مورد ارزیابی قرار گرفت که آماده‌سازی نمونه‌ها برای هر آزمون به اختصار توضیح داده می‌شود.

برای مواد اولیه و ورق سه لایه تولید شده پس از پیوند سرد نوردي، سه نمونه برای آزمون کشش در جهت نورد به وسیله ماشین واپرکات مطابق شکل 2 و استاندارد مربوطه^۱ آماده شد. آزمون کشش تکمحوره در دمای اتاق و با نرخ کرنش $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ و با استفاده از دستگاه سنتام انجام شد. مقدار ازدیاد طول نمونه‌ها از طریق اندازه‌گیری طول گیج، قبل و بعد از آزمون کشش تعیین شد. آزمون میکروسختی ویکرز نمونه‌ها با استفاده از دستگاه جیوس تحت بار 200 گرم و زمان اعمال بار 10 ثانیه در راستای عمود بر جهت نورد (در صفحه ضخامت و طول) اندازه‌گیری شد. قبل از انجام آزمون میکروسختی و میکروسکوپ نوری، جهت تسهیل در جایه‌جایی نمونه‌ها از مانت سرد استفاده شد. پس از مانت نمونه‌ها، سطح نمونه‌ها به کمک دستگاه پولیش گردن و با استفاده از سنباده‌های 800، 1000 و 1200 برای میکروسختی و سنباده‌های 800 تا 3000 برای بررسی ریزساختار (عکس‌برداری با استفاده از میکروسکوپ نوری) پرداخت شد. میکروسختی برای هر نمونه به صورت تصادفی در بیش از 10 نقطه مختلف اندازه‌گیری شد و پس از حذف بزرگترین و کوچکترین مقادیر، با میانگین گرفتن از بقیه مقادیر تعیین شد. سطح نمونه‌های شکست، پس از انجام آزمون کشش تک محوره، به منظور بررسی چگونگی برقراری اتصال نوردی بین لایه‌ها و تعیین

یافت، و برای نمونه‌های تیتانیوم و آلومینیوم تولید شده به روش تغییر شکل در کانال‌های زاویه‌دار مشابه، به ترتیب کاهش و افزایش چقرمگی شکست حاصل شده است.

در این تحقیق برای اولین بار چقرمگی شکست برای ورق‌های سه لایه آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی به صورت تجربی و با استفاده از منحنی آر و نمونه‌های استاندارد مورد بررسی قرار گرفته است. در همه‌ی تحقیقات پیشین، چقرمگی شکست برای نمونه‌های تولید شده تحت فرآیندهای مختلف تغییر شکل شدید پلاستیک از یک جنس بوده و در این تحقیق برای اولین بار چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای برای نمونه‌ی کامپوزیتی بررسی شده است. علاوه بر بررسی چقرمگی شکست، خواص مکانیکی، سطح مقطع شکست و ریزساختار نمونه‌ی کامپوزیتی تولید شده به روش پیوند سرد نوردی با استفاده از آزمون‌های کشش تکمحوره^۲، میکروسختی ویکرز، عکس‌برداری با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روشنی و میکروسکوپ نوری^۳ مورد بررسی قرار گرفت.

2- روش تحقیق

خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در این پژوهش (آلومینیوم 5052 با ضخامت 1 میلی‌متر و مس خالص تجاری با ضخامت 1 میلی‌متر) با استفاده از آزمون‌های کشش تکمحوره، میکروسختی محاسبه شده و در جدول 1 ارائه شده است.

2-1- فرآیند پیوند سرد نوردی

به منظور بررسی خواص مکانیکی، ریزساختاری و چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای، ورق سه لایه آلومینیوم-مس-آلومینیوم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی، نمونه‌های اولیه (آلومینیوم آلیاژی 5052 و مس خالص تجاری) در ابعاد 120 میلی‌متر طول و 50 میلی‌متر عرض بریده شد. شماتیک فرآیند پیوند سرد نوردی در شکل 1 نشان داده شده است. بر این اساس ابتدا دو قطعه از ورق اولیه آلومینیومی و یک ورق مسی با استفاده از آب و صابون شسته شده و سپس در حمام استون چربی زدایی می‌شود و پس از عملیات چربی‌زدایی، توسط برس فولادی سطوحی که در تماس با یکدیگر هستند، خراشیده و زیر می‌شوند و سپس سه ورق مسی در دورنی را مس خالص تجاری تشکیل دهد روی آلومینیوم آلیاژی 5052 و لایه دورنی را مس خالص تجاری را مسخنیده و در مرحله بعد نمونه‌ها را از چهار طرف سوراخ کرده و توسط سیم مسی بهم محکم بسته می‌شوند و سپس پیوند نوردی با 50% کاهش ضخامت برقرار شد. توجه شود که به منظور جلوگیری از اکسیدشدن لایه‌های سطحی، زمان بین آماده‌سازی سطوح و عملیات نورد نباید بیشتر از 150 ثانیه باشد [30]. در مرحله بعد ورق‌های روی هم گذاشته شده به وسیله جلوگیری از لغزش آن‌ها بر روی هم، نمونه‌ها را از اتصال نورد شده و پیوند نوردی با قطر غلطکهای 110 میلی‌متر و در دمای اتاق نورد شده و پیوند مورد نظر بین لایه‌های در تماس (مس و آلومینیوم) ایجاد می‌شود.

2-2- بررسی خواص مکانیکی و شکست

در این تحقیق پس از ساخت ورق سه لایه آلومینیوم/مس/آلومینیوم و علاوه بر آزمون شکست و بررسی چقرمگی شکست، خواص مکانیکی به وسیله آزمون کشش تکمحوره و میکروسختی، بررسی ریزساختار به وسیله میکروسکوپ

¹ Uni-axial tensile test

² Scanning Electron Microscopy (SEM)

³ Optic Microscopy (OM)

Table 1 Mechanical properties of commercial purity Copper and AA5052 Aluminum alloy

جدول 1 خواص مکانیکی مس خالص تجاری و آلومینیوم آلیاژی 5052 (HV)	استحکام کششی (MPa)	ماده
92	281	آلومینیوم آلیاژی 5052
74	173	مس خالص تجاری

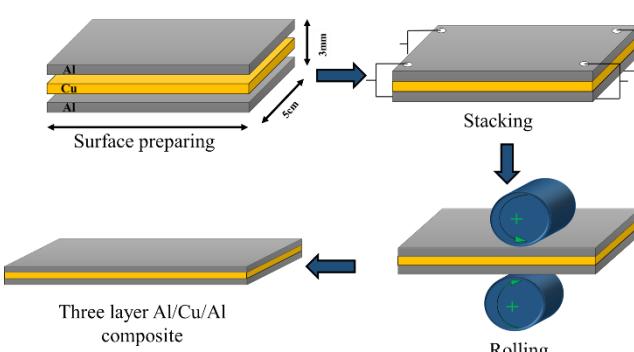


Fig.1 Schematic illustration of CRB process

شکل 1 شماتیک فرآیند نورد سرد پیوندی

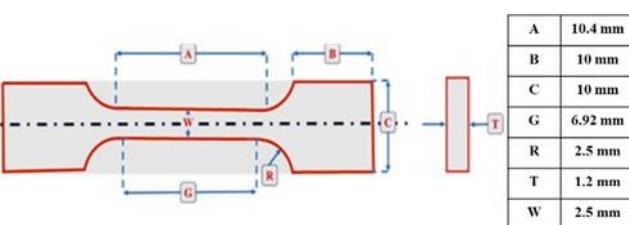


Fig.2 Dimensions of tensile test specimens used according to JIS Z2201

شکل 2 ابعاد نمونه‌های آزمون کشش استفاده شده براساس استاندارد JIS Z2201



Fig.4 CT specimens before fracture test

شکل 4 نمونه‌های کششی فشرده قبل از آزمون شکست

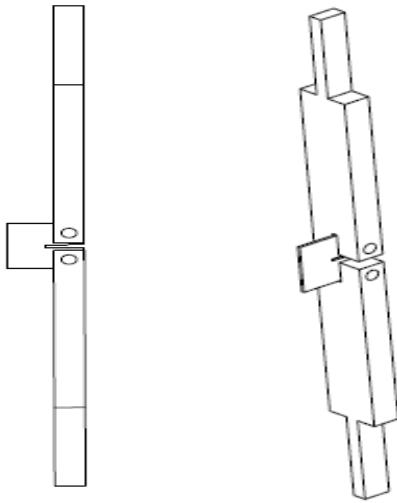


Fig.5 Schematic of how to place fixture and CT specimens

شکل 5 شماتیک نحوه قرار گرفتن قید و بند و نمونه‌های CT



Fig.6 Fixtures made for fracture test

شکل 6 قید و بند ساخته شده برای آزمایش شکست

3- نتایج و بحث

3-1- شکستنگاری و ریزساختار

در شکل‌های 9 و 10 سطح مقطع شکست ورق‌های آلومینیوم آلیاژی 5052 و مس خالص تجاری (قبل از فرآیند نورد سرد پیوندی) پس از انجام آزمون کشش تکمحوره نشان داده شده است. مکانیزم غالب شکست فلزات دارای

مکانیزم شکست در سیکل‌های مختلف با استفاده از میکروسکوپ الکترونی رویشی، مدل و گاتسکان¹ مورد بررسی قرار گرفت.

2-3- آزمون چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای

به منظور بررسی چقرمگی شکست برای نمونه‌های اولیه (آلومینیوم آلیاژی 5052 و مس خالص تجاری) و ورق سه‌لایه‌ی آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده با استفاده از فرآیند نورد سرد پیوندی، از هر ورق، سه نمونه مشابه به منظور تکرار پذیری، برای انجام آزمایش در نظر گرفته شد که مطابق با استاندارد ای 647²، نمونه‌های کششی فشرده³ با استفاده از ماشین واپرکات آماده شد. در ابتدا نمونه‌ها بر اساس نقشه موجود در شکل 3 و مطابق با شکل 4 و در ابعاد $23.75 \times 22.8 \times 1.5$ میلی‌متر در راستای عمود بر جهت نورد بریده شدند، سپس در این نمونه‌ها یک شیار نازک با عرض 1 و طول حدود 8 میلی‌متر به وسیله ماشین واپرکات ایجاد شد. همچنین این شیار به یک ناج وی شکل با زاویه 60 درجه ختم می‌شود و پس از آن به اندازه 1 میلی‌متر و عرض 0.25 میلی‌متر گسترش یافت. این شیار با استفاده از ماشین واپرکات با قطر سیم 0.2 میلی‌متر ایجاد شد. این تکنیک ایجاد و گسترش ترک اولین بار توسط موراد [31] و پس از آن توسط محمدی [25] استفاده شد. نسبت $a_0/w = 0.4$ یکسان برای همه نمونه‌ها ایجاد شد. قید و بند و پین‌هایی که در آزمایش از آن‌ها استفاده شده و نمونه به کمک آن‌ها نگه داشته شدند، باید صلب بوده و به‌گونه‌ای باشند که در حین بارگذاری، تغییر شکل آن‌ها خطایی در آزمایش ایجاد نکند. همچنین نباید در حین آزمایش، امکان پیچیدن نمونه و خارج شدن از راستای بارگذاری را داشته باشند. قید و بند بر طبق استاندارد ای 399⁴ برای نمونه‌های کششی فشرده، انتخاب طراحی و ساخته شدند. شکل‌های 5 و 6 شماتیک نحوه قرار گرفتن نمونه‌های کششی فشرده و قید و بند ساخته شده را نشان می‌دهد. توجه شود که نمونه‌های آماده شده برای بدست آوردن چقرمگی شکست در مود اول می‌باشد. همه نمونه‌ها تحت کنترل جایه‌جاسی، تحت بارگذاری شبیه استانیکی، با سرعت 0.5 mm/min و با استفاده از دستگاه سنتام در دمای محیط انجام شد. شکل 7 مجموعه آزمایش چقرمگی شکست را نشان می‌دهد. در شکل 8 نحوه قرار گرفتن پین و نمونه قبل از انجام آزمایش مشاهده می‌شود.

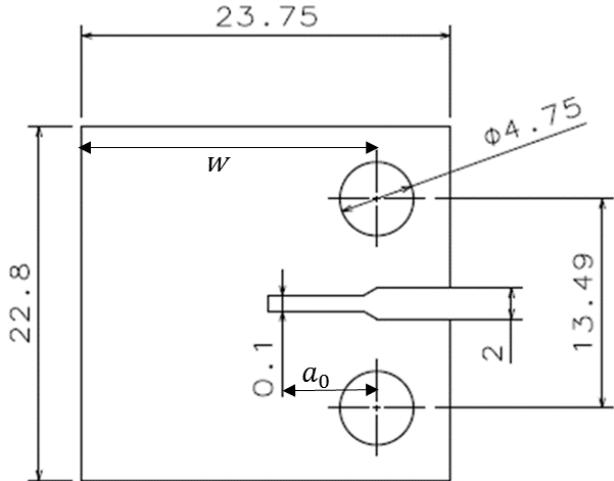


Fig.3 Map and dimensions of CT specimens

شکل 3 نقشه و ابعاد نمونه‌های کششی فشرده

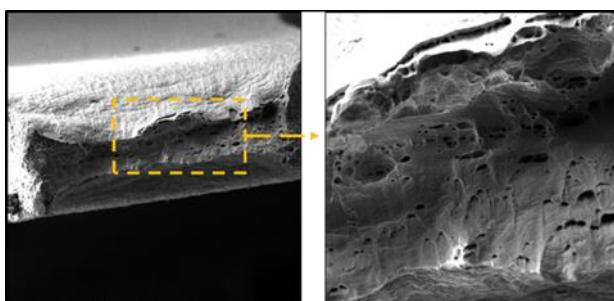
¹ VEGA TESCAN² ASTM E647³ Ct sample⁴ ASTM E-399

کاهش یافته است که دلیل اصلی این قضیه، اعمال کار سرد، کرنش زیاد و نهایتاً افزایش چگالی نابهجهای می‌باشد. با توجه به نمودار تنش-کرنش که بیانگر کاهش شکل‌پذیری و افزایش استحکام می‌باشد، می‌توان گفت که سطح مقطع شکست نیز تأثیرگذار است. این نتایج بوده و بیانگر این است که با اعمال کار سرد، استحکام افزایش یافته و از شکل‌پذیری آن نسبت به نمونه‌ی اولیه کاسته شده است. همچنین با توجه به شکل ۱۱ پیوند مناسب بین لایه‌های آلومینیوم و مس برقرار شده است و انفال و جدایش در سطح تماس لایه‌ها مشاهده نمی‌شود. همچنین نتایج حاصل از آزمون کشش تک محوره که بیانگر استحکام بالای کامپوزیت آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده با روش پیوند سرد نوردی می‌باشد، ثابت کننده این موضوع می‌باشد که پیوند مناسب بین لایه‌های آلومینیوم و مس برقرار شده است و انفال و جدایش در بین لایه‌ها مشاهده نمی‌شود. با توجه به تصاویر سطح مقطع شکست از نمونه‌های اولیه و کامپوزیت تولید شده به روش پیوند سرد نوردی به طور خلاصه می‌توان گفت که عکس‌های میکروسکوپ الکترون رویشی در شکل‌های ۹-۱۱ نشان می‌دهد که مکانیزم شکست نرم برای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/مس/آلومینیوم همانند نمونه‌های اولیه حاکم است، البته با این تفاوت که میکروحفرات برای نمونه‌ی کامپوزیتی نسبت به نمونه‌های اولیه کم‌عمرتر و کوچکتر شده‌اند، که دلیل آن کار سرد و اعمال کاهش ضخامت بالا می‌باشد.

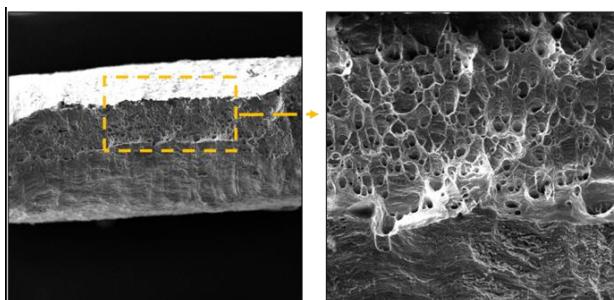
در شکل ۱۲، تصویر میکروسکوپ نوری ارائه شده است. در این شکل ریزساختار و ترتیب اتصال ورق‌های آلومینیوم و مس در کامپوزیت لایه‌ی آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده با روش نورد سرد پیوندی مشاهده می‌شود. با توجه به شکل ۱۲ نیز پیوند مناسب بین لایه‌ها ایجاد شده و انفال و جدایش در بین لایه‌ها مشاهده نمی‌شود.

2-3- خواص مکانیکی

شکل ۱۳ نمودار تنش کرنش مهندسی برای کامپوزیت Al/Cu فرآوری شده



شکل ۹ سطح مقطع مس خالص تجاری



شکل ۱۰ سطح مقطع شکست آلومینیوم آلیاژی 5052

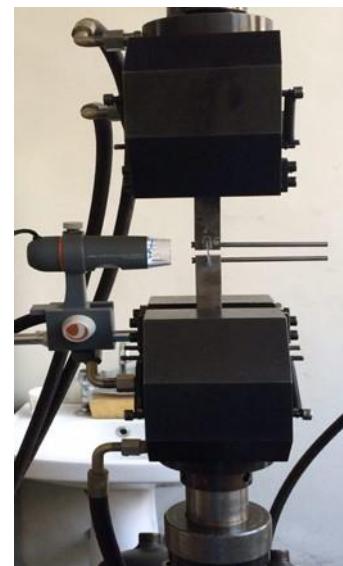


Fig.7 Experimental set-up

شکل ۷ مجموعه آزمایش چقمرمگی شکست

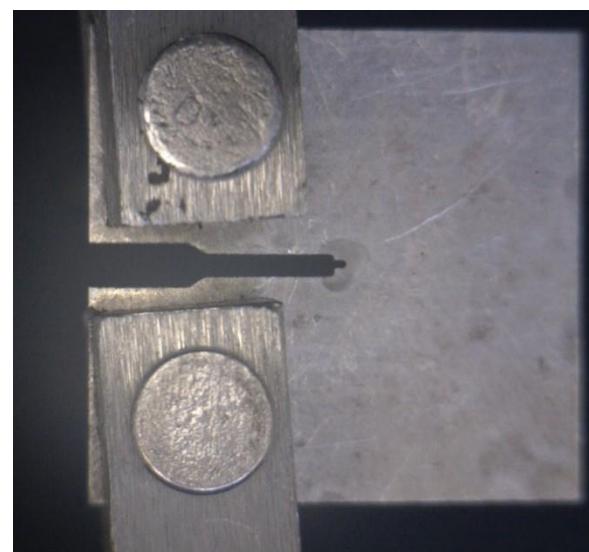


Fig.8 قید و بند و نمونه قبل از آزمون شکست

شکل ۸ قید و بند و نمونه قبل از آزمون شکست

ساختار کریستالی مکعبی وجود مرکز پر، ایجاد حفره^۱ و شکست نرم^۲ می‌باشد. از مشخصات شکست نرم تحت تاثیر تنش کششی، ظاهر گشتن گلوبی^۳ و ایجاد حفره‌های بسیار ریز در درون ریز از اتصال آن‌ها به یکدیگر تا رسیدن به حد یک ترک ریز و رشد آرام ترک تا حد پارگی یا شکست نهایی است [32]. در شکل ۱۱، سطح مقطع شکست نمونه‌ی کامپوزیتی و سه‌لایه‌ی آلومینیوم/مس/آلومینیوم پس از آزمون کشش تک محوره مشاهده می‌شود. همچنین در این شکل، تصاویر برای هر دو لایه آلومینیوم و مسی، به صورت مجزا و با بزرگنمایی بیشتر نمایش داده شده است.

در شکل ۱۱ (لایه‌های آلومینیوم و مس بعد از نورد سرد پیوندی)، واضح است که نسبت به شکل‌های ۹ و ۱۰ نمونه‌های اولیه و قبل از فرآیند نورد سرد پیوندی)، دارای حفرات کمتر می‌باشد و همچنین عمق حفرات نیز

¹dimple

²ductile fracture

³necking

مقایسه دو لایه میکروسختی ویکرز انجام شده است. نتایج حاصل از آزمون میکروسختی نیز این امر را تایید می‌کند و نشان می‌دهد که مقدار سختی برای هر دو لایه آلومینیوم و مس در کامپوزیت تولید شده، نسبت به نمونه‌های اولیه خودشان به شدت افزایش می‌یابد و به ترتیب برای آلومینیوم و مس، از مقادیر 74.3 و 92 به 136 و 103 می‌رسد. از علل افزایش میکروسختی می‌توان به کارسرد، اعمال کرنش زیاد و افزایش چگالی نابهجه‌ای اشاره کرد که در کارهای مشابه قبلی نیز ذکر شده‌اند و از عوامل موثر در افزایش سختی بوده‌اند [33,30].

با توجه به شکل 14 که نتایج حاصل از آزمون میکروسختی نشان می‌دهد که علاوه بر اینکه سختی برای هر دو لایه آلومینیوم و مس بعد از نورد و در کامپوزیت تولید شده نسبت به قبل از نورد افزایش یافته است، مشاهده می‌شود که مقدار میکروسختی اولیه مسی در کامپوزیت تولید شده نسبت به لایه‌ی آلومینیومی افزایش بیشتری داشته است، بهطوری که نز افزایش میکروسختی برای مس 82.5% و برای آلومینیوم 12.1% می‌باشد. دلیل این اختلاف در افزایش میکروسختی برای نمونه‌های آلومینیوم و مس را می‌توان اختلاف در انرژی نقش در چینش دو ورق اولیه دانست.

3-3- چرمگی شکست تنش صفحه‌ای

پس از انجام آزمایش چرمگی شکست تنش صفحه‌ای، باید طول ترک به صورت پیوسته و در نیروهای مختلف اندازه‌گیری شود. طبق استاندارد

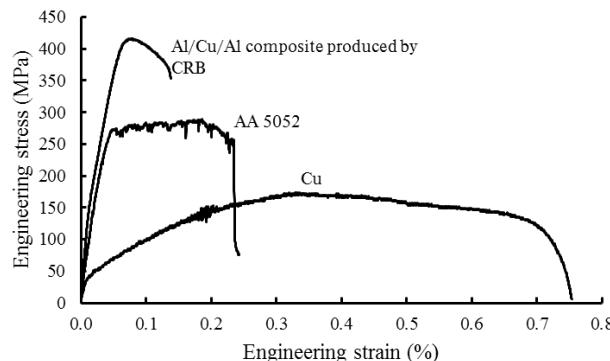


Fig.13 Engineering stress-strain curves of initial samples and Al/Cu/Al composite produced by CRB process

شکل 13 منحنی تنش-کرنش مهندسی برای نمونه‌های اولیه و کامپوزیت Al/Cu/Al تولید شده به روش پیوند سرد نوردی

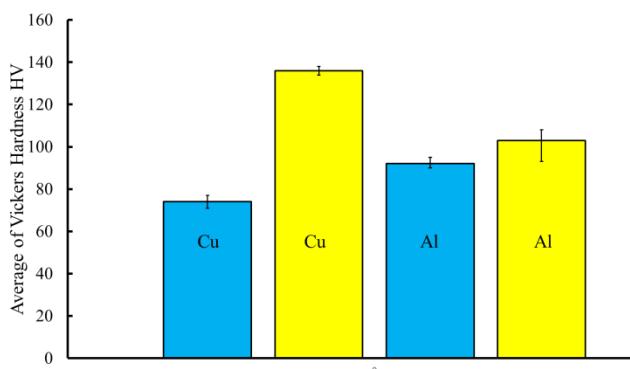
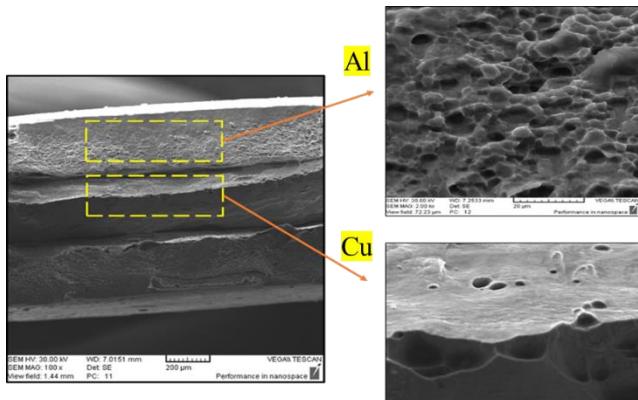
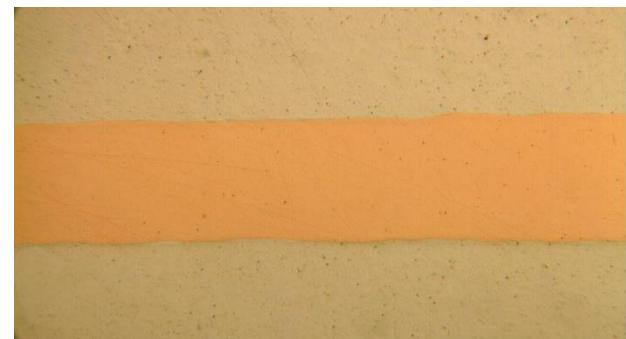


Fig.14 Microhardness variations Al and Cu strips before and after CRB process

شکل 14 تغییرات میکروسختی برای لایه‌های آلومینیوم و مس قبل و بعد از فرآیند نورد سرد پیوندی



شکل 11 سطح مقطع شکست کامپوزیت Al/Cu/Al تولید شده با استفاده از فرآیند نورد سرد پیوندی



شکل 12 ریزساختار کامپوزیت Al/Cu/Al تولید شده با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردی

با استفاده از روش پیوند سرد نوردی و نمونه‌های اولیه (آلومینیوم آلیازی 5052 و مس خالص) را نشان می‌دهد. همان‌طور که مشاهده می‌شود، کامپوزیت تولید شده، استحکام کششی بیشتری نسبت به ورق‌های اولیه دارد و استحکام کششی آن به مقدار 414.5 مگاپاسکال می‌رسد که مطابق با جدول 2 نسبت به ورق‌های مس و آلومینیوم اولیه به ترتیب 140% و 48% افزایش یافته است. البته مقدار ازدیاد طول برای نمونه‌ی کامپوزیت تولید شده نسبت به ورق‌های اولیه کاهش یافته است و با توجه به اعمال کرنش زیاد (کاهش ضخامت 60%) و انجام کار سرد (نورد در دمای اتاق) افزایش استحکام کشش و کاهش ازدیاد طول، کاملاً منطقی و قابل پیش‌بینی می‌باشد. البته بهدلیل شکل پذیری زیاد مس اولیه، مقدار ازدیاد طول نمونه‌ی تولید شده نسبت به تحقیقات پیشین مطلوب می‌باشد. همچنین تحقیقات پژوهشگران دیگر نیز روند تغییرات در خواص مکانیکی بدست آمده را تایید می‌کند [33].

علاوه بر آزمون کشش تک محوره، مطابق با شکل 14 مقدار میکروسختی ویکرز برای نمونه‌های اولیه و لایه‌های آلومینیوم و مس کامپوزیت تولید شده به روش پیوند سرد نوردی و به صورت مجزا محاسبه و با یکدیگر مقایسه شد. افزایش میزان میکروسختی بهدلیل اعمال کارسرد و افزایش کرنش سختی برای هر دو لایه‌ی آلومینیوم و مس در کامپوزیت تولید شده قبل پیش‌بینی می‌باشد ولی بهدلیل بدست آوردن مقدار میکروسختی، درصد افزایش و



Fig.15 CT specimens after fracture test and crack growth path

شکل ۱۵ نمونه‌های کششی فشرده بعد از آزمون شکست و مسیر رشد ترک

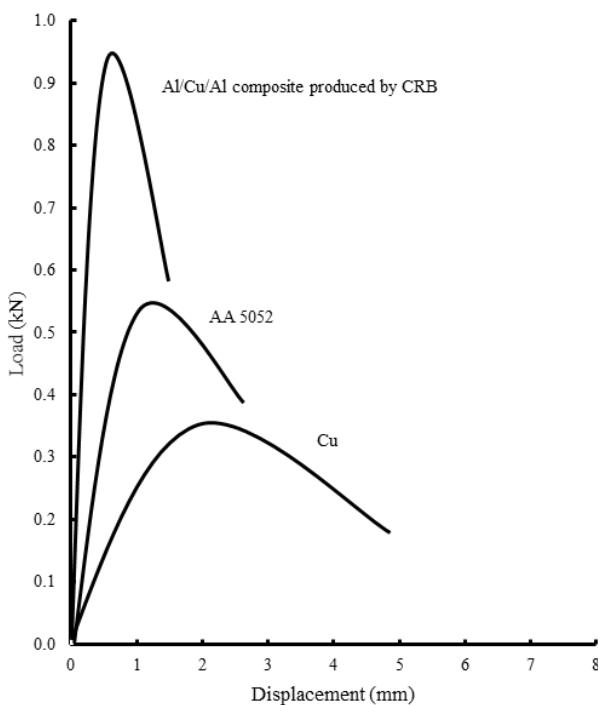


Fig.16 Load-displacement curve in the fracture test of initial sample and Al/Cu/Al composite produced by CRB

شکل ۱۶ نمودار نیرو-جایه‌جایی در آزمون شکست برای نمونه‌های اولیه و سه لایه شده به روش نورد سرد پیوندی

ترسیم شده است. مطابق با شکل ۱۷ نقاط تماس بین منحنی‌های آر و خطوط خطچین، مقادیر فاکتور شدت تنش بحرانی در طول ترک مورد نظر می‌باشد. این بدان معناست که در لحظه‌ای که سطح فاکتور شدت تنش در قطعه، برابر میزان مقاومت شکست ماده می‌شود رشد ترک به صورت ناپایدار آغاز می‌گردد. همان‌طور که از شکل ۱۷ نیز مشاهده می‌شود، در یک جز افزایش بعد از نقطه تماس، مقدار فاکتور شدت تنش اعمال شده از مقاومت

ای^۱ ۶۴۷ دو روش برای اندازه‌گیری طول ترک در حین انجام آزمایش وجود دارد:

- روش بصری
- روش اختلاف پتانسیل الکتریکی

که در این پژوهش، اندازه‌گیری رشد ترک به صورت بصری و با استفاده از میکروسکوپ مدل سلسیترون^۲ انجام شده است.

در این پژوهش مطابق با استاندارد ای^۳ ۵۶۱ و به منظور محاسبه چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای نمونه‌ها از منحنی آر استفاده شد. در روش منحنی آر، در یک طول ترک، تغییرات مقاومت به رشد ترک بر حسب تغییر طول ترک ترسیم می‌شود و مقاومت به رشد ترک با افزایش نیرو و طول ترک افزایش می‌یابد. همچنین تغییرات فاکتور شدت تنش اعمال شده^۴ بر حسب تغییرات طول ترک در سه سطح مختلف از نیروهای ثابت نیز به وسیله چطچین ترسیم می‌شود. در تحقیق حاضر نیز از این روش برای محاسبه چقرمگی شکست استفاده شده است که در ادامه توضیح داده می‌شود.

همان‌طور که اشاره شد، چقرمگی شکست از محل تماس دو نمودار مقاومت به رشد ترک و فاکتور شدت تنش اعمال شده محاسبه می‌شود. مقدار مقاومت به رشد ترک با استفاده از فرمول زیر محاسبه می‌شود. همچنین مقادیر فاکتور شدت تنش اعمال شده در چند نیروی ثابت در سطوح مختلف و بر حسب تغییرات طول ترک ترسیم می‌شود. محل تماس بین منحنی‌های فاکتور مقاومت به رشد ترک و شدت تنش اعمال شده، چقرمگی شکست یا فاکتور شدت تنش بحرانی برای نمونه مورد نظر می‌باشد.

$$k_{r_i} = \frac{p_i}{b\sqrt{W}} \times f_i\left(\frac{a}{W}\right)$$

$$f_i\left(\frac{a}{W}\right) = \left[\frac{2 + \frac{a}{w}}{\left(1 - \frac{a}{w}\right)^{\frac{3}{2}}} \right] [0.886 + 4.64\left(\frac{a}{W}\right) - 13.32\left(\frac{a}{W}\right)^2 + 14.72\left(\frac{a}{W}\right)^3 - 5.6\left(\frac{a}{W}\right)^4]$$

رابطه بالا برای $\frac{a}{w} \geq 0.35$ صادق می‌باشد.

در شکل ۱۵ نمونه‌ی تغییر شکل یافته‌ی کامپوزیتی و سه‌لایه‌ی آلومینیوم/مس/آلومینیوم، پس از آزمون چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای ارائه شده است. همچنین در این شکل مشخص است که رشد ترک در یک مسیر مستقیم و در راستای همان ترک اولیه می‌باشد.

شکل ۱۶، نمودار نیرو-جایه‌جایی را برای نمونه‌های اولیه و سه لایه کامپوزیتی آلومینیوم/مس/آلومینیوم، تولید شده به روش پیوند سرد نوردی نشان می‌دهد. جایه‌جایی نمودار، جایه‌جایی دهانه ترک در نظر گرفته شده است. با توجه به شکل واضح است که نیروی گسترش ترک با افزایش رشد ترک و تا نقطه بیشترین مقدار نیرو، برای هر سه نمونه افزایش می‌یابد و این افزایش به صورت خطی می‌باشد همچنین نیروی گسترش ترک برای نمونه سه لایه کامپوزیتی به مرتبه بیشتر از نمونه‌های اولیه شده است. مقدار نیروی بیشینه با استفاده از شکل ۱۶ به دست می‌آید و مقادیر آن در جدول ۲ ارائه شده است. نیروی رشد ترک بیشینه برای نمونه سه‌لایه در مقایسه با نمونه‌های اولیه بیش از دو برابر می‌باشد.

چقرمگی شکست برای هر نمونه با استفاده از معادلات بالا و بر اساس استاندارد ای^۳ ۵۶۱ محاسبه شد. نمودار آر برای نمونه‌های سه لایه کامپوزیتی آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده به روش پیوند سرد نوردی، در شکل ۱۷

¹ ASTM E-647

² Celestron

³ ASTM E561

⁴ Kapplied

از کامپوزیت‌های تولید شده با این روش به عنوان جایگزین مناسب برای مواد پر هزینه در ساخت و تولید مانند آلیاژهای تیتانیومی در صنایع مختلف مانند هوا فضا، صنایع نظامی و غیره استفاده شود.

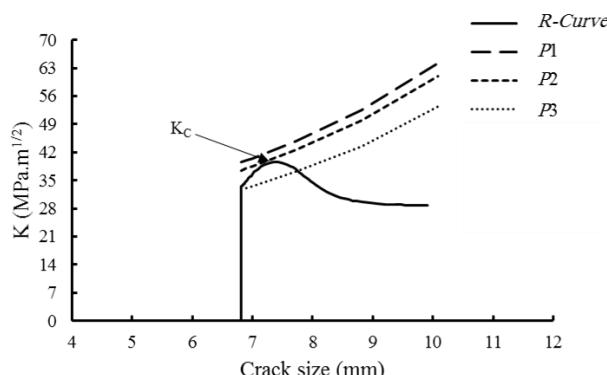
4- نتایج

در این تحقیق، نمونه‌ی کامپوزیتی و سه لایه‌ی آلومینیوم/مس/آلومینیوم با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوری تولید شد و خواص مکانیکی، شکست نگاری مورد بررسی قرار گرفت. همچنین در این تحقیق، برای اولین بار، چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای تحت بارگذاری در مود اول و برای مواد کامپوزیت لایه‌ای و کاربردی تولید شده به روش پیوند سرد نوری بر اساس استاندارد کششی فشرده که با استفاده از ماشین واپرکات آماده شد، مورد بررسی قرار گرفت و نتایج زیر حاصل شد:

1- کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/مس/آلومینیوم با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوری با اعمال کاهش ضخامت 60% تولید شد. همچنین با توجه به تصویر میکروسکوپ نوری ضخامت لایه‌ها کاهش یافته و پیوند مناسب بین لایه‌ها ایجاد شد.

2- خواص مکانیکی کامپوزیت تولید شده به مرتب بهتر از مواد اولیه استفاده شده می‌باشد بهطوری که مقادیر استحکام کششی و 415 میکروسختی ویکرز افزایش می‌یابد و استحکام کششی 3-5 مگاپاسکال حاصل می‌شود و البته مقدار از دید طول کاهش یافته است. مقدار استحکام کششی برای کامپوزیت آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده نسبت به مقادیر استحکام کششی برای نمونه‌های اولیه آلومینیوم و مس به ترتیب 48% و 140% افزایش یافته است.

3- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روشنی نشان می‌دهد که مکانیزم شکست نرم همانند نمونه‌های اولیه (آلومینیوم آلیاژی 5052 و مس



شکل ۱۷ منحنی آر برای کامپوزیت Al/Cu/Al تولید شده با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوری

Table 2 Results of mechanical properties and fracture tests

استحکام کششی (مگاپاسکال)	نیروی بیشینه (کیلونیوتون)	چقرمگی شکست (مگاپاسکال متر ^{0.5})	ماده
281	552	21.3	آلومینیوم آلیاژی 5052
178	368	14.6	مس خالص تجاری
415	941	38.7	کامپوزیت Al/Cu/Al تولید شده با روش پیوند نوری

جدول ۲ نتایج آزمون‌های خواص مکانیکی و شکست

ماده بیشتر می‌شود که میان رشد نایابدار ترک است. نمودار مشکی رنگ، نمودار آر و نمودارهای خط چین، نمودار فاکتور شدت تنش اعمال شده در نیروهای مختلف و ثابت می‌باشد. همان‌طور که در شکل‌های ذکر شده مشخص است، مقدار چقرمگی شکست برای هر نمونه از تماس بین منحنی آر و شدت تنش اعمال شده در نیروی ثابت بدست می‌آید. براساس جدول ۲ که در آن نتایج حاصل از محاسبه چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای نیز مشخص است مقادیر چقرمگی شکست برای نمونه‌های اولیه آلومینیوم و مس و نمونه‌ی کامپوزیت سه‌لایه آلومینیوم/مس/آلومینیوم، تولید شده به روش پیوند سرد نوری به ترتیب 21.3 و 14.6 و 38.7 می‌باشد که بیانگر بهبود مقدار چقرمگی شکست تنش صفحه‌ای برای نمونه‌ی کامپوزیتی آلومینیوم/مس/آلومینیوم نسبت به نمونه‌های اولیه آلومینیوم و مس به میزان 81% و 165% می‌باشد. همان‌طور که مشخص است اعمال کار سرد و متعاقباً افزایش در مقدار استحکام و سختی می‌تواند یکی از دلایل افزایش چقرمگی شکست برای نمونه‌ی کامپوزیتی آلومینیوم/مس/آلومینیوم در مقایسه با نمونه‌های اولیه آلومینیوم و مس باشد.

پارامتر چقرمگی شکست برای نمونه‌هایی با هندسه‌ی مشابه می‌تواند تحت تاثیر استحکام و چقرمگی (شکل پذیری) باشد. نتایج حاصل از آزمون کشش نشان می‌دهد که در فرآیند پیوند سرد نوری، به دلیل اعمال کار سرد و کرنش زیاد، استحکام افزایش می‌یابد و مقدار شکل‌دهی کاهش یافته است، اما نتایج چقرمگی شکست حاکی از بهبود چقرمگی شکست تا حدود 3-2 برابر نمونه‌های اولیه می‌باشد که این کار می‌تواند به سبب وجود مس خالص با چقرمگی بسیار بالا و ایجاد ترکیب مناسب آن با آلومینیوم آلیاژی 5052 باشد. البته همان‌طور که قبل از ذکر شد، افزایش استحکام در حین فرآیند نیز از دلایل دیگر افزایش چقرمگی شکست می‌باشد ولی این پارامتر به تنهایی نمی‌تواند موجب افزایش 3-2 برابر چقرمگی شکست شود، زیرا در تحقیقات پیشین برای مواد تولید شده با روش‌های مختلف تغییر شکل شدید پلاستیک، روند و نرخ افزایش استحکام حتی بیشتر از تحقیق حاضر بوده است، ولی بهدلیل افزایش استحکام و کاهش بیش از حد چقرمگی، باعث کاهش چقرمگی شکست یا افزایش ناچیز آن نسبت به نمونه‌های اولیه شده است [28-25].

بنابراین بهطور خلاصه می‌توان گفت که بنابر تحقیقات پیشین و نتایج کار حاضر می‌توان گفت که تولید کامپوزیت در فرآیندهای تغییر شکل شدید پلاستیک و استفاده از مواد با چقرمگی بالا در کنار مواد با استحکام مناسب می‌تواند منجر به دست‌یابی به ترکیب خوبی از خواص مواد اولیه شود و مانند تحقیق حاضر و طبق جدول ۲، شاهد بهبود چشم‌گیر در استحکام، سختی و چقرمگی شکست باشیم.

با استفاده از روش ساده و کم هزینه فرآیند پیوند سرد نوری و همچنین استفاده از مواد مناسب می‌توان کامپوزیت‌هایی با خواص بسیار مطلوب در چقرمگی شکست، خواص مکانیکی، و نسبت استحکام به وزن بالا تولید کرد و

- [9] A. Yahirō, T. Masui, T. Yoshida, D. Doi, Development of nonferrous clad plate and sheet by warm rolling with different temperature of materials, *ISIJ International*, Vol. 31, No. 6, pp. 647-654, 1991.
- [10] H. Madaah-Hosseini, A. Kokabi, Cold roll bonding of 5754-aluminum strips, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 335, No. 1, pp. 186-190, 2002.
- [11] H. Danesh-Manesh, A. Karimi Taheri, Study of mechanisms of cold roll welding of aluminum alloy to steel strip, *Materials Science And Technology*, Vol. 20, No. 8, pp. 1064-1068, 2004.
- [12] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, Effect of friction, annealing conditions and hardness on the bond strength of Al/Al strips produced by cold roll bonding process, *Materials & Design*, Vol. 31, No. 9, pp. 4508-4513, 2010.
- [13] N. Karakazov, *Diffusion bonding of metals*, Chapter 1 and 8; London, Pergamon Press Oxford, 1985.
- [14] R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, Investigation of the parameters of the cold roll bonding (CRB) process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 9, pp. 2320-2326, 2010.
- [15] M. Eizadjou, H. D. Manesh, K. Janghorban, Investigation of roll bonding between aluminum alloy strips, *Materials & Design*, Vol. 29, No. 4, pp. 909-913, 2008.
- [16] H. D. Manesh, A. K. Taheri, The effect of annealing treatment on mechanical properties of aluminum clad steel sheet, *Materials & Design*, Vol. 24, No. 8, pp. 617-622, 2003.
- [17] M. Movahedi, H. Madaah-Hosseini, A. Kokabi, The influence of roll bonding parameters on the bond strength of Al-3003/Zn soldering sheets, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 487, No. 1, pp. 417-423, 2008.
- [18] M. Abbasi, M. R. Toroghinejad, Effects of processing parameters on the bond strength of Cu/Cu roll-bonded strips, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, No. 3, pp. 560-563, 2010.
- [19] M. Alizadeh, M. Paydar, Study on the effect of presence of TiH₂ particles on the roll bonding behavior of aluminum alloy strips, *Materials & Design*, Vol. 30, No. 1, pp. 82-86, 2009.
- [20] N. Tsuji, Y. Saito, H. Utsunomiya, S. Tanigawa, Ultra-fine grained bulk steel produced by accumulative roll-bonding (ARB) process, *Scripta Materialia*, Vol. 40, No. 7, pp. 795-800, 1999.
- [21] M. Shaarafab, M. R. Toroghinejad, Nano-grained copper strip produced by accumulative roll bonding process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 473, No. 1, pp. 28-33, 2008.
- [22] M. Eizadjou, A. K. Talachi, H. D. Manesh, H. S. Shahabi, K. Janghorban, Investigation of structure and mechanical properties of multi-layered Al/Cu composite produced by accumulative roll bonding (ARB) process, *Composites Science and Technology*, Vol. 68, No. 9, pp. 2003-2009, 2008.
- [23] D. Yang, P. Cizek, P. Hodgson, C. e. Wen, Ultrafine equiaxed-grain Ti/Al composite produced by accumulative roll bonding, *Scripta Materialia*, Vol. 62, No. 5, pp. 321-324, 2010.
- [24] K. Wu, H. Chang, E. Maawad, W. Gan, H. Brokmeier, M. Zheng, Microstructure and mechanical properties of the Mg/Al laminated composite fabricated by accumulative roll bonding (ARB), *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 13, pp. 3073-3078, 2010.
- [25] B. Mohammadi, M. Tavoli, F. Djavanroodi, Effects of Constrained Groove Pressing (CGP) on the plane stress fracture toughness of pure copper, *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 52, No. 5, pp. 957-969, 2014.
- [26] A. Hohenwarter, R. Pippan, Fracture toughness evaluation of ultrafine-grained nickel, *Scripta Materialia*, Vol. 64, No. 10, pp. 982-985, 2011.
- [27] I. Sabirov, R. Z. Valiev, I. P. Semenova, R. Pippan, Effect of Equal Channel Angular Pressing on the Fracture Behavior of Commercially Pure Titanium, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 41, No. 3, pp. 727-733, 2010.
- [28] H. Darban, B. Mohammadi, F. Djavanroodi, Effect of equal channel angular pressing on fracture toughness of Al-7075, *Engineering Failure Analysis*, Vol. 65, pp. 1-10, 2016.
- [29] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Experimental investigation of plane stress fracture toughness for two layers of aluminum sheets produced by cold roll bonding process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 17, No. 2, pp. 101-108, 2017. (in Persian)
- [30] R. Jamaati, M. Toroghinejad, Cold roll bonding bond strengths: review, *Materials Science and Technology*, Vol. 27, No. 7, pp. 1101-1108, 2011.
- [31] A. Mourad, M. Alghafri, O. A. Zeid, S. Maiti, Experimental investigation on ductile stable crack growth emanating from wire-cut notch in AISI 4340 steel, *Nuclear engineering and design*, Vol. 235, No. 6, pp. 637-647, 2005.
- [32] A. Pineau, A. A. Benzerga, T. Pardo, Failure of metals III. Fracture and fatigue of nanostructured metallic materials, *Acta Materialia*, pp. 508-544, 2015.
- [33] D. Rahmatabadi, R. Hashemi, Experimental investigation of fracture surfaces and mechanical properties of AA1050 aluminum produced by accumulative roll bonding process, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 16, No. 10, pp. 305-312, 2016. (in Persian)

خالص) برای کامپوزیت لایه‌ای آلومینیوم/مس/آلومینیوم نیز حاکم است، البته با این تفاوت که میکروحرفات برای نمونه‌ی کامپوزیتی نسبت به نمونه‌های اولیه کم عمق تر و کوچکتر شده‌اند، که اعمال کرنش زیاد و کار سرد باعث کاهش تعداد و کم عمق شدن دیمپل‌های موجود در لایه‌های کامپوزیت تولید شده نسبت به ورق‌های اولیه شده است و این تغییرات حاکی از افزایش استحکام و کاهش شکل‌پذیری می‌باشد که نتایج تحقیقات گذشته و نمودار تنش-کرنش نیز تایید کننده این موضوع می‌باشد.

-4- مقدار میکروسختی ویکرز برای لایه‌های آلومینیوم و مس بعد از فرآیند نسبت به قبل از فرآیند به ترتیب 82.5% و 12.1% افزایش یافته است که کارسند و افزایش کرنش سختی دلایل اصلی این افزایش می‌باشد.

-5- مقدار چرمگی شکست تنش صفحه‌ای برای نمونه‌ی کامپوزیتی به مراتب بالاتر از مواد اولیه استفاده شده در این تحقیق می‌باشد که مقدار آن برای نمونه‌ی سه لایه کامپوزیتی آلومینیوم/مس/آلومینیوم تولید شده با استفاده از فرآیند پیوند سرد نوردي 38.7 می‌باشد و در مقایسه با نمونه‌های اولیه آلومینیوم و مس به ترتیب حدود 81% و 165% افزایش یافته است. علاوه بر اعمال کار سرد و افزایش استحکام، وجود مس با چرمگی بالا در کامپوزیت تولید شده، یکی دیگر از دلایل مهم این افزایش در مقدار چرمگی شکست می‌باشد.

5- فهرست علایم

طول ترک اولیه (mm)	a_0
ضخامت (mm)	B
مقاومت به رشد ترک (MPam ^{1/2})	k_r
عرض (mm)	w

6- مراجع

- R. Jamaati, M. R. Toroghinejad, A. Najafizadeh, An alternative method of processing MMCs by CAR process, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 10, pp. 2720-2724, 2010.
- D. Lee, B. Kim, Nanostructured Cu-Al₂O₃ composite produced by thermochemical process for electrode application, *Materials Letters*, Vol. 58, No. 3, pp. 378-383, 2004.
- I. Estrada-Guel, C. Carreño-Gallardo, D. Mendoza-Ruiz, M. Miki-Yoshida, E. Rocha-Rangel, R. Martínez-Sánchez, Graphite nanoparticle dispersion in 7075 aluminum alloy by means of mechanical alloying, *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 483, No. 1, pp. 173-177, 2009.
- L. Li, K. Nagai, F. Yin, Progress in cold roll bonding of metals, *Science and Technology of Advanced Materials*, volume 9, issue 2, 2008.
- J. Lee, D. Bae, W. Chung, K. Kim, J. Lee, Y. Cho, Effects of annealing on the mechanical and interface properties of stainless steel/aluminum/copper clad-metal sheets, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 187, pp. 546-549, 2007.
- J. Ouyang, E. Yarrapareddy, R. Kovacevic, Microstructural evolution in the friction stir welded 6061 aluminum alloy (T6-temper condition) to copper, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, No. 1, pp. 110-122, 2006.
- D. Milner, L. Vaidyanath, Significance of surface preparation in cold pressure welding, *British welding Journal*, Vol. 7, pp. 1-6, 1960.
- J. Yong, P. Dashu, L. Dong, L. Luoxing, Analysis of clad sheet bonding by cold rolling, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 105, No. 1, pp. 32-37, 2000.